

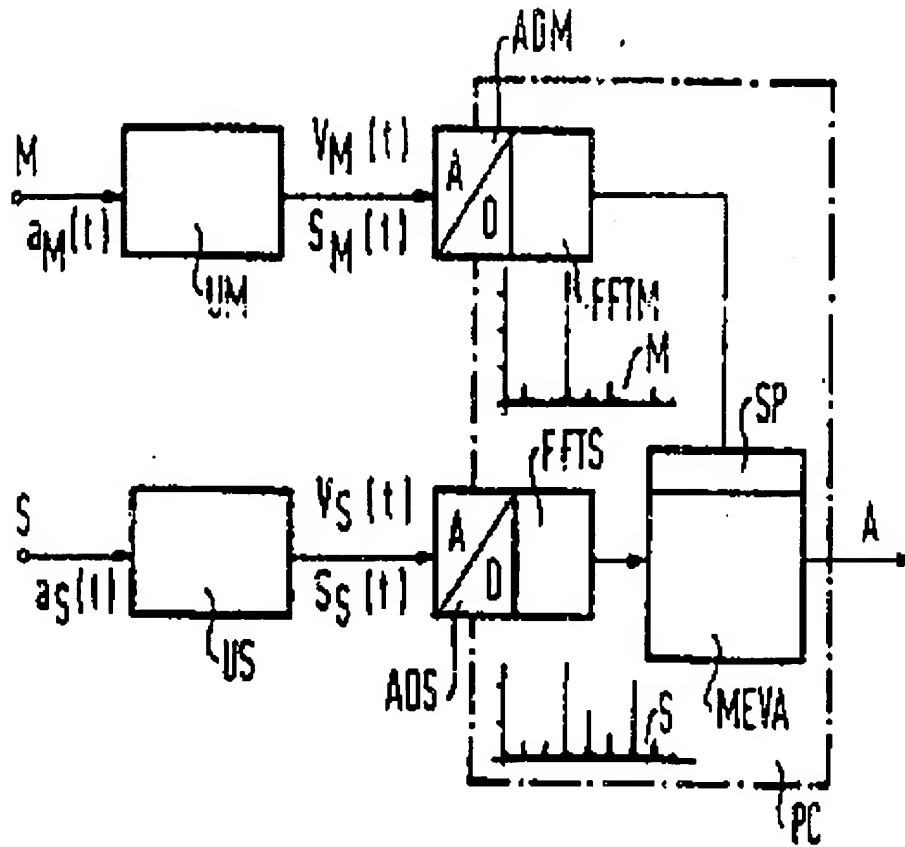
AN: PAT 1990-369494  
TI: Diagnosing mechanical properties of machines from vibration signals compared in frequency domain with pattern signals after fast fourier transformation  
PN: **DE4017448-A**  
PD: 06.12.1990  
AB: The diagnosis of the mechanical properties of machines involves using the vibration of a rotating part and/or of the whole machine as the detection signal (S). The detection signal is transformed from the time domain into the frequency domain by Fast Fourier Transformation (FFTS). In the frequency domain the detection signal is compared with a pattern signal (M) formed for the normal state or for defined error states. Deviations of the detection signal from the pattern signal are indicated. \USE/ADVANTAGE; Typical machine defects can be rapidly and reliably diagnosed from routinely formed vibration images.  
PA: (SIEI ) SIEMENS AG;  
IN: LATTKA A;  
FA: **DE4017448-A** 06.12.1990;  
CO: DE;  
IC: G01M-001/22; G01M-007/02; G01M-013/00; G01M-015/00;  
MC: S02-J03; S02-J08;  
DC: S02;  
FN: 1990369494.gif  
PR: EP0110152 05.06.1989;  
FP: 06.12.1990  
UP: 10.12.1990

22553 U.S.P.T.O.  
10/764295



012304

**THIS PAGE BLANK (USPTO)**



**THIS PAGE BLANK (USPTO)**

01P07063

51

①9 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENTAMT

①2 Offenlegungsschrift  
①1 DE 40 17 448 A1

②1 Aktenzeichen: P 40 17 448.4  
②2 Anmeldetag: 30. 5. 90  
④3 Offenlegungstag: 6. 12. 90

⑤1 Int. Cl. 5:  
G 01 M 7/02  
G 01 M 13/00  
G 01 M 1/22  
G 01 M 15/00

DE 40 17 448 A1

③0 Unionspriorität: ③2 ③3 ③1  
05.06.89 EP 89 11 0152.9

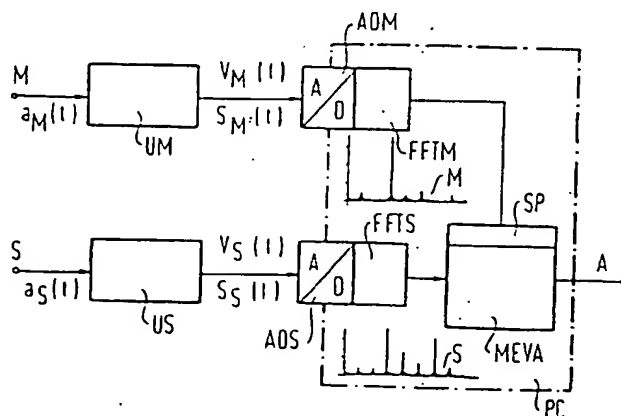
⑦1 Anmelder:  
Siemens AG, 1000 Berlin und 8000 München, DE

⑦2 Erfinder:  
Lattka, Alexander, Dr.-Ing., 7517 Waldbronn, DE

⑤4 Verfahren zur Diagnose der mechanischen Eigenschaften von Maschinen

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Diagnose der mechanischen Eigenschaften von Maschinen, in denen Schwingungen verursachende, rotierende Bauteile vorhanden sind. Um eine schnelle und zuverlässige Methode zu schaffen, mit der routinemäßig gewonnene Schwingungsbilder verarbeitet werden können, um typische Maschinenfehler zu diagnostizieren, wird das Detektionssignal durch ein Frequenztransformationsverfahren (FFT) aus dem Zeitbereich in den Frequenzbereich transformiert und die Untersuchung des Signals im Frequenzbereich vorgenommen. Die Erfindung ist vor allem bei der Überwachung und Diagnose von Maschinen mit rotierenden Teilen in Produktionsanlagen anwendbar.

FIG 1



DE 40 17 448 A1

## Beschreibung

## Technisches Gebiet

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Diagnose der mechanischen Eigenschaften von Maschinen, die rotierende Bauteile aufweisen, mit den Merkmalen des Oberbegriffs des Anspruchs 1.

Eine optimale Ausnutzung von Produktionsanlagen führt dazu, daß dort vorhandene Maschinen sehr stark belastet werden, und als Folge hiervon treten häufiger Schäden und Maschinenausfälle auf. Der Zustand dieser Maschinen (z. B. Pumpen, Kompressoren, Turbinen, Elektromotoren, Ventilatoren und Werkzeugmaschinen) muß daher unabhängig von deren Leistung, Größe und Einsatzart routinemäßig gemessen werden, wobei der zeitliche Trend interessant ist und eventuell mit Grenzwerten verglichen wird.

## Stand der Technik

Bei einem bekannten Verfahren dieser Art (DE-OS 33 14 005) wird die für den Zustand der Maschinen aussagekräftige Maschinendiagnose durch Trend- und Grenzwertüberwachung der Maschinenschwingungen gelöst. Dieses Verfahren basiert im wesentlichen auf Grenzwertüberwachung von verschiedenen Kenngrößen, die aus der detektierten Maschinenschwingung gewonnen werden:

## Darstellung der Erfindung

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, eine schnelle und zuverlässige Methode anzugeben, aus routinemäßig gewonnenen Schwingungsbildern typische bekannte Maschinenfehler zu diagnostizieren.

Zur Lösung dieser Aufgabe weist ein Verfahren die Merkmale des Kennzeichens des Anspruchs 1 auf und ist mit den Merkmalen der Unteransprüche in vorteilhafter Weise weiterzubilden.

Beim erfindungsgemäßen Verfahren werden zunächst sogenannte Fehler- oder Schädigungsbilder, z. B. Korrosion, Ermüdung, Verschleiß, unsachgemäße Nutzung, Unwucht etc., aus dem Schwingungsverhalten der Maschine gewonnen und als Mustersignal mit dem Detektionssignal im Frequenzbereich verglichen.

Das Mustersignal wird beispielsweise mit Hilfe eines Beschleunigungsaufnehmers aufgenommen und als Schwingungsbeschleunigungssignal zu einem Signalwandler geführt. Dort wird das detektierte Zeitsignal verstärkt und in eine Schwinggeschwindigkeit und/oder einen Schwingweg umgewandelt. Weiter kann also das Mustersignal je nach Bedarf in einer dieser Signalformen benutzt werden. Das analoge Mustersignal wird sodann in vorteilhafter Weise in einem Analog/Digital-Wandler digitalisiert und mittels einer FFT-Transformation (Fast-Fourier-Transformation) in die Frequenzebene transformiert. Das somit aus einer Anzahl von Frequenzspektren bestehende Mustersignal kann auf einfache Weise im Speicher eines Digitalrechners abgespeichert werden. Das Detektionssignal wird dagegen regelmäßig während des Betriebes der Maschine erfaßt und mit den abgespeicherten Mustersignalen auf Gleichheit oder Ähnlichkeit untersucht. Auch das Detektionssignal kann in vorteilhafter Weise von einem Beschleunigungsaufnehmer gewonnen werden und auf gleichem Wege wie das Mustersignal verarbeitet werden.

Im Digitalrechner können die beiden Signale mit Hilfe des erfindungsgemäßen Korrelationsverfahrens gemäß Unteranspruch 4 verglichen werden. Der mathematische Zusammenhang zur Erlangung einer Aussage über die Korrelation der beiden Signale ergibt sich hierbei aus dem Matrizenprodukt der einzelnen Korrelationswerte jedes Verfahrensschrittes. Für den i-ten Korrelationswert g<sub>i</sub> gilt:

$$g_i = (m_1, m_2, \dots, m_n) \begin{pmatrix} s_i \\ s_{i+1} \\ \vdots \\ s_{i+n-1} \end{pmatrix} = m \cdot s_i$$

und für den folgenden Wert

$$g_{i+1} = (m_1, m_2, \dots, m_n) \begin{pmatrix} s_{i+1} \\ s_{i+2} \\ \vdots \\ s_{i+n} \end{pmatrix} = m \cdot s_{i+1}$$

Die Korrelation zwischen den einzelnen Mustersignalwerten m und Detektionssignalwerten s kann symbolisch auch als Korrelationsprodukt

$$G = M \odot S$$

dargestellt werden.

## Kurze Beschreibung der Ausführungsbeispiele der Erfindung

Die Erfindung wird anhand der Figuren erläutert, wobei  
 Fig. 1 ein Blockschaltbild einer Schaltungsanordnung zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens,  
 Fig. 2 und 3 Frequenzspektren der zu untersuchenden Signale,  
 Fig. 4 bis 6 Ersatzschaltbilder einer Korrelation und  
 Fig. 7 eine weitere Darstellung der Frequenzspektren zeigen.

## Bester Weg zur Ausführung der Erfindung

In der Fig. 1 ist ein Blockschaltbild zur Auswertung von Mustersignalen M und Detektionssignalen S dargestellt, wobei das Mustersignal M am Eingang der Schaltung das Schwingungssignal einer zu untersuchenden, hier nicht dargestellten Maschine im Zeitbereich darstellt, welches bei vorgegebenen Fehlern bzw. Schädigungen erfaßt worden ist. Das Detektionssignal S stellt das laufend im Betrieb der Maschine aufgenommene Schwingungssignal dar. Beide Signale sind beispielsweise Ausgangssignale von Beschleunigungsaufnehmern, so daß die entsprechenden Beschleunigungssignale  $a_M(t)$  bzw.  $a_S(t)$  die Schwingbeschleunigung im Muster- bzw. Detektionsfall darstellen.

In Signalwandlerschaltungen UM und US werden diese Signale jeweils in Schwinggeschwindigkeitssignale  $V_M(t)$  bzw.  $V_S(t)$  bzw. in Schwingwegsignale  $S_M(t)$  bzw.  $S_S(t)$  umgewandelt. Beide Signale werden jeweils über einen Analog/Digital-Umsetzer ADM bzw. ADS einer Frequenztransformationsschaltung FFTM bzw. FFTS zugeführt. Zwei beispielhafte Verläufe eines Mustersignals M und eines Detektionssignals S im Frequenzbereich sind unterhalb der Bausteine FFTM bzw. FFTS skizziert. Die Analog/Digital-Wandler ADM und ADS können als Bestandteile eines Digitalrechners PC, der noch einen Speicher SP und einen Korrelatorprogrammbaustein MEVA aufweist, ausgeführt sein. Das Ausgangssignal des Frequenztransformationsbausteins FFTM wird hierbei in den Speicher SP geladen und dort für die Korrelation mit dem Detektionssignal S zur Verfügung gehalten. Zur Korrelation, die anschließend beschrieben wird, werden das Detektionssignal S und ein abgespeichertes Mustersignal M miteinander verglichen, wobei das Ausgangssignal A das Ergebnis dieser Korrelation darstellt.

Im folgenden wird anhand von Beispielen erläutert, wie die Fehler- bzw. Schädigungsbilder, die als Mustersignale M abgespeichert sind, mit jeweils im Betrieb erfaßten Detektionssignalen S korreliert und so insgesamt für die Maschinendiagnose verwendet werden.

Im linken Teil der Fig. 2 ist eine Folge von Spektrallinien eines Mustersignals M gezeigt, bei denen untersucht werden soll, ob und an welchen Stellen dieses Mustersignal M im rechten Teil, der das Detektionssignal S zeigt, enthalten ist. Wird der Vergleich stückweise vorgenommen, so wird das Mustersignal M Abtastwert für Abtastwert am Detektionssignal S vorbeigeschoben, und es werden dabei jeweils übereinanderliegende Spektrallinien des Mustersignals M und des Detektionssignals S verglichen. Besteht das Mustersignal M beispielsweise aus n Werten, dann sind nach jeder Verschiebung n Vergleiche erforderlich; diese können darin bestehen, jeweils das Verhältnis von Detektionssignalwert zu Mustersignalwert zu bilden. Sind alle n Verhältnisse gleich, liegt das gesuchte Mustersignal M in der Signalfolge des Detektionssignals S vor. Die Verhältnissbildung ist relativ aufwendig und führt insbesondere nur dann zum Ziel, wenn der entsprechende Signalabschnitt des Detektionssignals S bis auf einen konstanten Verstärkungsfaktor exakt mit dem Mustersignal M übereinstimmt. Hierbei muß man davon ausgehen, daß die Signale mehr oder weniger durch additive oder nichtlineare Störungen verzerrt sind, d. h., man erhält in der Regel anstelle einer Übereinstimmung eine mehr oder weniger große Ähnlichkeit zwischen Detektionssignal S und Mustersignal M.

Es ist somit vorteilhaft, für jede Verschiebung aus den betreffenden Detektionssignal- und Mustersignalwerten eine Zahl zu ermitteln, die angibt, wie groß die gerade vorliegende Ähnlichkeit ist. Eine derartige Zahl läßt sich dadurch gewinnen, daß nach jeder Verschiebung übereinanderstehende Werte von Mustersignal M und Detektionssignal S multipliziert werden und alle Produkte addiert werden.

Ein Beispiel für diese Vorgehensweise ist in der Fig. 3 angegeben, wo im oberen Teil das detektierte Signal S mit Spektrallinien  $S_1, S_2, S_3$ , in der Mitte verschiedene Positionen 1 ... 5 eines Mustersignals M mit ebenfalls einer Anzahl Spektrallinien relativ zum Detektionssignal S und im unteren Teil das Korrelationsergebnis G mit den einzelnen Korrelationswerten  $g_1 \dots g_5$  dargestellt sind.

Das Detektionssignal S nach Fig. 3 enthält in diesem Fall das Mustersignal M und besteht ansonsten nur aus Nullwerten. Sind das Detektionssignal S und das Mustersignal M deckungsgleich, so sind alle Korrelationswerte  $g_1 \dots g_5$  positiv, und die Summe ist maximal ( $G_{max}$ ). Bei einer Verschiebung aus dieser Position wird die Summe kleiner, weil die Korrelationswerte  $g_1 \dots g_5$  zum Teil unterschiedliches Vorzeichen bekommen und sich bei der anschließenden Addition größtenteils kompensieren. Für den Idealfall der exakten Übereinstimmung von Detektionssignal S und Mustersignal M arbeitet dieses Verfahren sehr genau. Aber auch wenn die Signalwerte geringfügig vom Sollverlauf abweichen, zeigt sich die noch weitgehende Ähnlichkeit des Detektionssignals S mit dem Mustersignal M durch das Fortbestehen des Maximums ( $G_{max}$ ). Dieses kann beispielsweise bei Überschreiten eines geeignet gewählten Schwellwertes detektiert werden und somit auf die Existenz und die Lage des Mustersignals M im Detektionssignal S geschlossen werden. Die Höhe des Schwellwertes legt dabei fest, bis zu welchem Grad an Ähnlichkeit ein Signalabschnitt im Detektionssignal S noch als eventuell verzerrtes Mustersignal M gedeutet werden soll.

Der Vorgang des Verschiebens, der Produktbildung und der Addition stellen die Verfahrensschritte der Korrelation dar. Fig. 4 zeigt den vorher beschriebenen Vorgang schematisch durch eine Korrelation eines weiteren Detektionssignals S mit einem Mustersignal M.

Ein weitgehend automatisiertes Korrelationsverfahren beruht darauf, daß das Korrelationsergebnis gleichbleibt, wenn man, anstatt mit dem Mustersignal M am Detektionssignal S entlangzufahren, die Signalfolge des Detektionssignals in umgekehrter Richtung am Mustersignal M entlangschiebt. Man kann z. B. die Folge der Spektralwerte des Detektionssignals S seriell in ein hier nicht näher dargestelltes Schieberegister eingeben und nach jeder Verschiebung die Registerinhalte mit Koeffizienten, die den Mustersignalwerten m gleich sind, multiplizieren und alle Produkte addieren. Dieses Verfahren ist schematisch in Fig. 5 dargestellt.

Gemäß der Verfahrensvariante nach Fig. 5 kann nach zwei Alternativen vorgegangen werden. Entweder die Detektionssignalwerte s werden von rechts nach links durch ein Schieberegister geschoben und es werden die Mustersignalwerte m von links nach rechts angeordnet oder es werden die Detektionssignalwerte s in umgekehrter Richtung durch das Schieberegister geschoben und es werden die Mustersignalwerte m ebenfalls umgekehrt angeordnet. Schieberichtung der Detektionssignalwerte s und Anordnung der Mustersignalwerte m sind also stets entgegengesetzt gerichtet; das Korrelationsergebnis G ist in beiden Fällen identisch. Enthält das einlaufende Detektionssignal S das gesuchte Mustersignal M, so tritt das Korrelationsmaximum  $G_{\max}$  dann auf, wenn der entsprechende Signalabschnitt voll im Korrelationsregister steht, d. h., wenn der letzte Wert des Signalabschnitts in das Schieberegister eingelaufen ist.

Das erläuterte Verfahren läßt sich auf einem herkömmlichen Digitalrechner PC (vgl. Fig. 1), beispielsweise auf einem Personalcomputer, in der Programmiersprache BASIC realisieren. Ein Beispiel für ein solches Programm mit den beiden oben erläuterten Alternativen ist unten angegeben.

10 N = : M =

20 DIM R(N), K(N), S(M), G(M)

30 Eingabe der Koeffizienten und der Eingangswerte

40 FOR I = 1 TO M

50 FOR J = N - 1 TO 1 STEP -1

60 R(J + 1) = R(J)

70 NEXT J

80 R(1) = S(I)

oder

50 FOR J = 2 TO N

60 R(J - 1) = R(J)

70 NEXT J

80 R(N) = S(I)

90 G = 0

100 FOR K = 1 TO N

110 G = G + R(K) \* K(K)

120 NEXT K

130 G(I) = G

140 NEXT I

Die Detektionssignalwerte s aus einem Schieberegister SR gemäß Fig. 6 werden bei der Ausführung dieses Programms mit den Mustersignalwerten m eines weiteren Schieberegisters SK korreliert, wobei das Ergebnis im Schieberegister RG abgelegt wird. Bevor ein Signal in ein Eingangsschieberegister SE eingegeben wird, werden die dort bereits gespeicherten Werte um eine Zelle nach rechts bzw. links verschoben (Programmzeilen 50 ... 70); dabei fällt der "älteste" (ganz rechts bzw. links stehende) Wert heraus. Dann wird der neue Wert eingegeben (Programmzeile 80). Anschließend beginnt die eigentliche Korrelation (Programmzeile 100 ... 120), deren Ergebnis in das Ausgangsregister SG eingeschrieben wird (Programmzeile 130). Das Eingeben der Daten in die Korrelatoranordnung nach Fig. 6 sowie das Ablegen der Ergebnisse wird durch die Schleife mit der Laufvariablen (Programmzeilen 40 ... 140) vorgenommen.

Die Korrelation läßt sich zur weiteren Verdeutlichung mathematisch durch ein Matrizenprodukt wie folgt darstellen. Für den i-ten Korrelationswert  $g_i$  gilt:

$$g_i = (m_1, m_2, \dots, m_n) \begin{pmatrix} s_i \\ s_{i+1} \\ \vdots \\ s_{i+n-1} \end{pmatrix} = m \cdot s_i$$

und für den folgenden Wert



$$g_{i+1} = (m_1, m_2, \dots, m_n) \begin{pmatrix} s_{i+1} \\ s_{i+2} \\ \vdots \\ s_{i+n} \end{pmatrix} = m \cdot s_{i+1}$$

Die Korrelation zwischen den einzelnen Mustersignalwerten  $m$  und Detektionssignalwerten  $s$  kann symbolisch auch als Korrelationsprodukt

$$G = M \odot S$$

dargestellt werden.

Ein weiteres Beispiel zur Ausführung des Verfahrens wird anhand der Fig. 7 erläutert, wo oben das Mustersignal  $M$  angegeben ist, auf das die Korrelation einzustellen ist. Ein Korrelator  $K$  wird symbolisch durch einen Block dargestellt, in den die Mustersignalwerte  $m$  eingezeichnet sind. Diese stimmen mit den Mustersignalwerten  $m$  überein, nur sind sie von rechts nach links angeordnet, da das Mustersignal  $M$  hier von links eingeschoben wird. Unter dem Korrelator  $K$  sind die Eingangs- und Ausgangssignale  $S, G$  angegeben. Die Eingangssignalfolge besteht hierbei aus einem Mustersignal  $M$  und einer Zufallsfolge (beide getrennt durch eine Anzahl von Nullwerten). Am Ausgang des Korrelators  $K$  erscheint, sobald das Muster  $M$  voll im Korrelator  $K$  steht, ein deutliches Maximum. Verläßt der Musterabschnitt den Korrelator  $K$ , werden die Werte am Ausgang kleiner. Die anschließende Zufallsfolge ist trotz ihrer größeren Amplitude nicht in der Lage, ein Ausgangssignal zu liefern, welches das Korrelationsmaximum  $G_{\max}$  des Mustersignals  $M$  erreicht, d. h., die Zufallsfolge enthält keinen Abschnitt, der mit dem Mustersignal  $M$  übereinstimmt.

#### Gewerbliche Anwendbarkeit

Die Erfindung ist vor allem bei der Überwachung und Diagnose von Maschinen mit rotierenden Teilen in Produktionsanlagen anwendbar.

#### Patentansprüche

1. Verfahren zur Diagnose der mechanischen Eigenschaften von Maschinen, die rotierende Bauteile aufweisen,
  - bei dem Schwingungen der rotierenden Bauteile und/oder der gesamten Maschine als Detektionssignal ( $S$ ) erfaßt werden,
  - dadurch gekennzeichnet, daß
    - das Detektionssignal ( $S$ ) mit einem schnellen Frequenztransformationsverfahren (FFT) aus dem Zeitbereich in den Frequenzbereich transformiert wird und daß
    - im Frequenzbereich das Detektionssignal ( $S$ ) mit einem Mustersignal ( $M$ ) verglichen wird und Abweichungen des Detektionssignals ( $S$ ) vom Mustersignal, das bei einem vorgegebenen Normalzustand oder bei bekannten Fehlerbildern gebildet ist, angezeigt werden.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß
  - das Mustersignal ( $M$ ) und das Detektionssignal ( $S$ ) jeweils als Beschleunigungssignal ( $a_M(t)$  bzw.  $a_S(t)$ ) aufgenommen werden,
  - sodann jeweils in ein Geschwindigkeitssignal ( $V_M(t), V_S(t)$ ) oder ein Wegsignal ( $S_S(t), S_M(t)$ ) umgewandelt werden,
  - diese Signale ( $V_M(t), V_S(t); S_S(t), S_M(t)$ ) digitalisiert und in den Frequenzbereich transformiert werden und daß
  - das Mustersignal ( $M$ ) und das Detektionssignal ( $S$ ) mit Hilfe eines Korrelatorprogramms in einem Digitalrechner (PC) miteinander verglichen werden.
3. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß
  - eine Anzahl von Mustersignalen ( $M$ ) bei vorgegebenen Fehlerbildern der Maschine ermittelt und in einem Speicher (SP) des Digitalrechners (PC) abgelegt werden.
4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß
  - zur Korrelation die einzelnen Spektralanteile der Frequenzspektren in aufeinanderfolgenden Verfahrensschritten des Mustersignals ( $M$ ) und des Detektionssignals ( $S$ ) miteinander multipliziert werden und eine Addition aller so gewonnenen Produkte vorgenommen wird, wobei
  - nach jedem dieser Verfahrensschritte die Spektralanteile entweder des Mustersignals ( $M$ ) oder des Detektionssignals ( $S$ ) gegenüber dem jeweils anderen Signal um einen vorgegebenen Betrag ( $\Delta f$ ) im Frequenzbereich verschoben werden und die Korrelation jeweils neu durchgeführt wird, so daß sich ein Gesamtkorrelationswert  $G = M \odot S$  als Vergleichsergebnis ergibt.

Hierzu 4 Seite(n) Zeichnungen

- Leerseite -

FIG 1

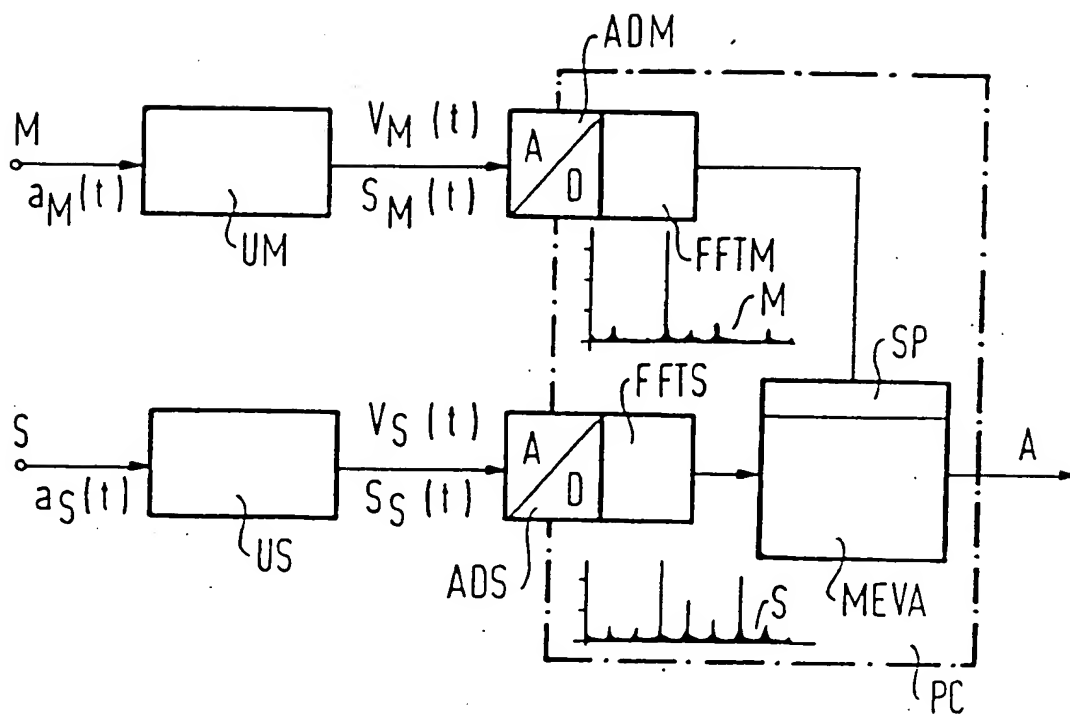


FIG 2

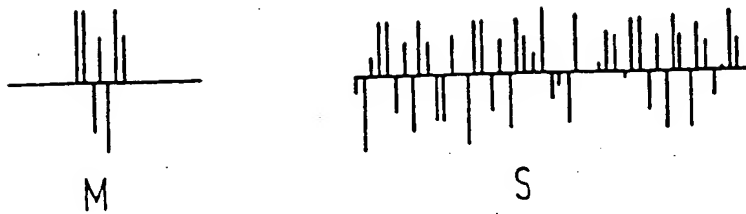
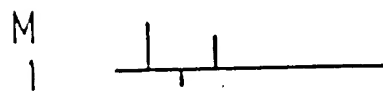
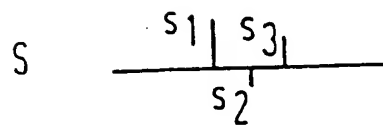
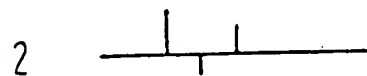


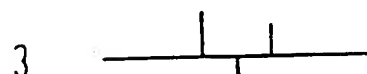
FIG 3



$$g_1 = s_1 s_3$$



$$g_2 = s_1 s_2 + s_2 s_3$$



$$g_3 = s_1^2 + s_2^2 + s_3^2$$



$$g_4 = s_2 s_1 + s_3 + s_2$$



$$g_5 = s_3 s_1$$

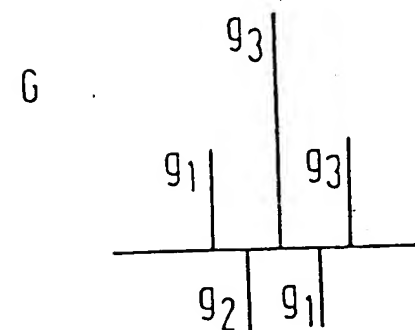


FIG 4

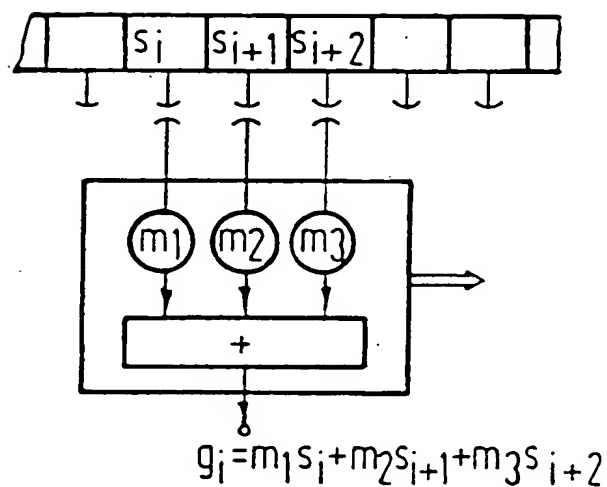


FIG 5

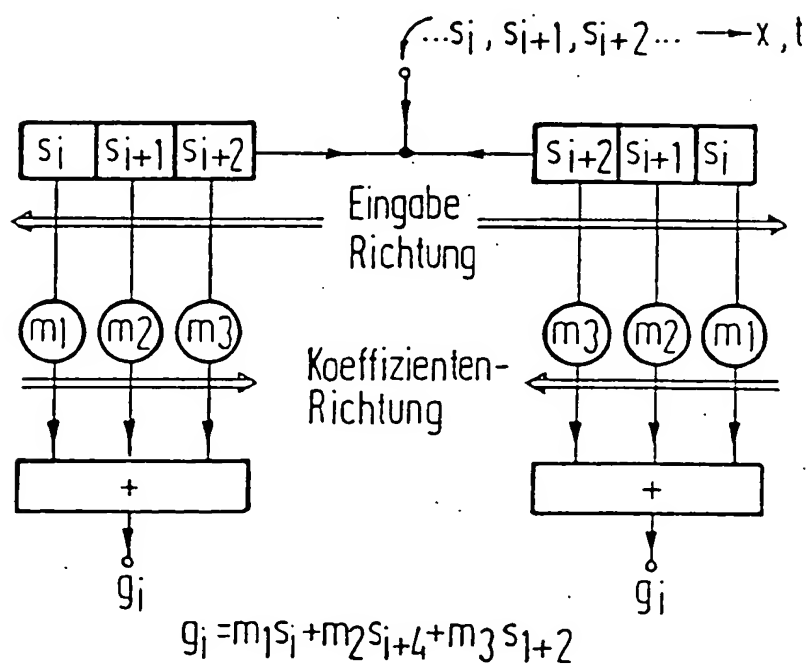


FIG 6

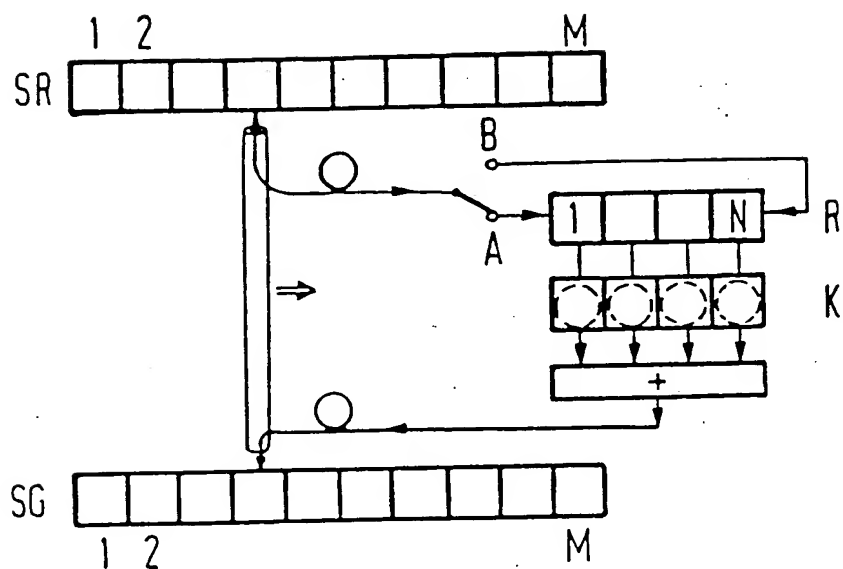


FIG 7

